ChinaXiv合作期刊

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

黄土高塬沟壑区绿水变化趋势及驱动因素分析

王绍娜[1]， 宋孝玉[1]， 李蓝君[1]， 李怀有[2]， 李垚林[2]
（1. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室，陕西 西安 710048；
2. 黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站，甘肃 庆阳 745000）

摘 要：绿水是维持黄土高原陆生生态系统用水的重要水源，它与植被的生长密切相关，分析绿水的变化特征并探讨影响其变化的因素有助于解决干旱半干旱地区水资源短缺以及生态环境安全问题。以黄土高塬沟壑区典型流域——砚瓦川流域为研究对象，采用傅抱璞模型评价了该流域1981—2016年的绿水资源量，利用Mann-Kendall统计检验和滑动*F*检验法对绿水量进行了趋势分析和突变检验，并用弹性系数法对影响绿水量的气候因素和下垫面因素进行了敏感性分析，最后基于水热耦合平衡方程对流域绿水变化进行了归因分析。结果表明：(1) 流域多年平均绿水资源量为503.7 mm，呈小幅上升趋势，2003年发生突变，突变之后绿水量呈波动增长趋势；(2) 在气候影响因素中，绿水对降水最为敏感，潜在蒸散发次之；(3) 在气候变化和土地利用综合影响时，绿水对降水最为敏感，其次是下垫面参数，而对潜在蒸散发的敏感度最小；(4) 气候变化和土地利用变化对绿水变化的贡献率分别为：74.42%和25.58%，表明气候变化是导致绿水变化的主要因素，其中降水和潜在蒸散发变化对绿水变化的贡献率分别为75.63%和-1.21%。

关 键 词：绿水；气候变化；土地利用变化；傅抱璞模型；归因分析
文章编号：

chinaXiv:202106.00074v1

绿水是指直接来源于降水并最终被用于蒸散消耗的水[1]，是维持黄土高原陆地生态系统景观协调和平衡的重要水源，其在支撑雨养农业和保障陆地生态系统稳定发展方面均具有不可忽视的作用[2-3]。绿水的存在形态包括“绿水流”和“绿水储存”[4]，绿水流指实际蒸散发，包括截留、蒸腾、土壤和水体表面蒸发，其可以反映植被的生理过程和水文循环过程，而绿水储存则是存储在土壤中的水分，是支持雨养农业的直接水源[5]。绿水是水循环过程的重要组成部分，特别是在干旱半干旱地区，其既决定于气候条件，又受制于土壤类型、植被种类和土地利用方式等。因此，在全球气候剧烈变化[6-7]以及流域实施植被措施[8]和工程措施[9]的影响下，掌握绿水的年际变化规律，探讨气候因素和土地利用因素的驱动作用，可以为干旱半干旱地区的绿水资源高效利用、植被恢复等提供理论依据[10-11]。

关于绿水的时空变化特征，前人已开展了一系列研究。赵安周等[12]基于SWAT模型评价了典型年份渭河流域蓝水、绿水的时空差异，认为在典型年份绿水流的变化相对于蓝水而言较稳定。甄婷婷等[13]运用SWAT模型估算了卢氏流域蓝水、绿水资源量，分析了蓝水、绿水资源量的时空分布规律。吕乐婷等[14]利用SWAT模型并结合SUFI-2算法评估了1977—2015年及典型年份细河流域蓝水绿水的时空分布状况，发现该流域水资源构成以绿水资源为主。Gerten等[15]利用Lund-Potsdam-Jena（LPJ）模型评估了全球尺度下土地利用变化对绿水流的影响，结果表明土地利用的转换大大减少了各个地区的绿水资源量。综上可知，现有研究针对绿水资源量进行评价时，主要集中于对大尺度流域、区域内绿水资源量进行分析与评价，而针对干旱、半干旱地区黄土高塬沟壑区典型小流域的绿水变

收稿日期：2020-04-26； **修订日期：**2020-11-13
基金项目：国家自然科学基金资助项目（41771259）；陕西省自然科学基础研究计划项目（2019JZ-45）
作者简介：王绍娜（1996-），女，硕士，主要从事水文学及水资源研究. E-mail: 1208766620@qq.com
通讯作者：宋孝玉（1971-），女，教授，博士生导师，主要从事水文学及水资源研究. E-mail: songxy@xaut.edu.cn

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202106.00074v1

化还没有系统的研究。此外,在分析绿水影响因素时,已有研究主要是分析单因素变化条件下绿水的响应规律,而定量分离气候变化和土地利用变化对绿水资源量及其时空分布规律影响的研究比较缺乏[16]。

基于此,本文以典型黄土高塬沟壑区砚瓦川流域为研究区域,在对流域年尺度降水、潜在蒸散发以及绿水资源量进行突变检验的基础上,定量突变前后气候变化和土地利用变化对流域绿水变化的贡献率,并探讨绿水资源量变化的主控因素。研究结果可对黄土高塬沟壑区绿水资源的可持续利用和生态恢复等提供科学指导。

1 研究区概况

砚瓦川流域系泾河水系,位于甘肃省庆阳市西峰区及宁县境内(107°37′~107°55′E,35°31′~35°44′N;图1),流域总面积为385.63 km^2,属于半湿润到半干旱、暖温带到中温带过渡地带,属于大陆性季风气候,流域多年平均降雨量为526.8 mm。流域主要地貌单元包括塬面、梁峁坡和沟谷3种类型,是黄河水利委员会西峰水保站于1951年建立的黄土沟壑区典型原型观测小流域,目前已积累了大量的降雨、径流等实测数据。自20世纪70年代以来,砚瓦川流域治理经历了4个主要阶段,即1981—1993年、1994—1999年、2000—2005年以及2005—2010年,治理工作包括修建水库和淤地坝、人工造林、人工种草以及水土保持生态工程等。

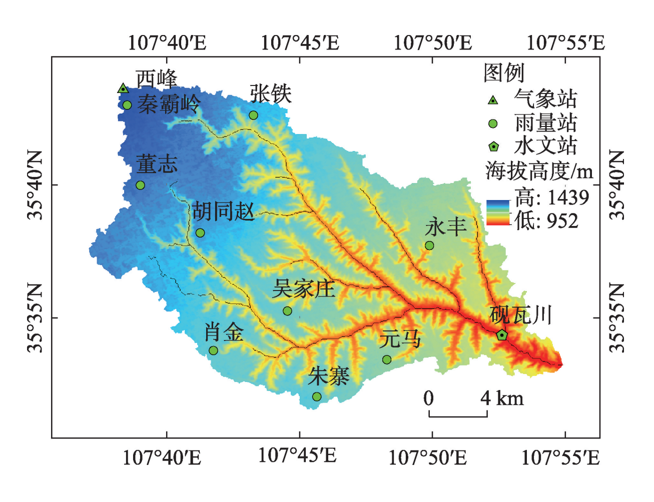


图1 砚瓦川流域地理位置及测站分布图

Fig. 1 Geographical location of Yanwachuan Basin and the distributions of meteorological, precipitation and hydrological stations

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文的研究时段是1981—2016年,降雨和径流资料均为实测资料。考虑到资料系列的连续性以及雨量站的分布情况,选用了系列连续且均匀分布在流域内的10个雨量站(图1),通过泰森多边形法求得流域的面雨量。径流资料来源于流域出口控制站砚瓦川水文站(图1)。气象数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/),包括平均气温、相对湿度、太阳辐射、日照时数和风速等。

根据流域治理的状况,选用了1989、1995、2000年和2010年砚瓦川流域1∶100000的土地利用数据,结合流域DEM范围,利用ArcGIS切割,得到砚瓦川流域4期典型年份的土地利用数据,以此为基础分析土地利用变化对绿水的影响。

2.2 研究方法

2.2.1 绿水资源量计算模型 本研究采用傅抱璞模型[17]来计算砚瓦川流域绿水资源量。傅抱璞模型[17]是我国气候学家傅抱璞教授在Budyko假设[18]的基础上通过量纲分析和数学推导出的实际蒸散发计算公式,与其他蒸散发计算公式相比,该模型综合考虑了下垫面条件对绿水资源的影响,其已被证实,许多流域应用效果良好[19]。模型具体形式如下:

$$\frac{ET_a}{P}=1+\frac{ET_0}{P}-\left[1+\left(\frac{ET_0}{P}\right)^{\omega}\right]^{1/\omega} \qquad (1)$$

式中:P为降水量(mm);ET_a为绿水资源量(mm);ET_0是潜在蒸散量(mm),本研究使用Priestley-Taylor公式[20]对其进行计算;ω为表征下垫面条件的参数,其取值范围为(1,∞)[17]。

2.2.2 模型验证

(1) 水量平衡法

对于一个闭合流域,年尺度的绿水水循环过程可表示为:

$$E+\Delta W=P-R \qquad (2)$$

式中:$E+\Delta W$为流域绿水资源量(mm);P为降水量(mm);R为径流量(mm)。

本研究将整个研究时段分为2阶段,1981—2007年的数据用来校准傅抱璞模型中的参数,2008—2016年的数据用来验证参数,以水量平衡法的计算结果为标准,对傅抱璞模型中的计算精度进行检验[19]。

ChinaXiv合作期刊

（2）评价指标

通过试错法[21]率定傅抱璞模型中的参数ω，用与水量平衡法计算结果的逐年相对误差（R_e）和均方根误差（RMSE）检验计算精度，并通过调整ω，使R_e和RMSE最小。计算公式如下：

$$R_e=\left(E_{f,i}-E_{wb,i}\right)/E_{wb,i} \tag{3}$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(E_{f,i}-E_{wb,i}\right)^2} \tag{4}$$

式中：n为研究时段；$E_{f,i}$为第i年模型模拟的绿水资源量（mm）；$E_{\omega b,i}$为水量平衡法计算的绿水资源量（mm）。

2.2.3 突变检验 Mann-Kendall（M-K）突变检验是常用的非参数检验方法[22]，常被用于水文气象长系列数据中各种变量的突变检验[23]，该法可以大致的确定突变点发生的年份，本文对绿水资源量的突变点检验用M-K法进行分析，并通过滑动F识别与检验法[24]来进行验证，滑动F检验法既可以对变异点进行识别，也可以对变异点进行检验。

2.2.4 土地利用特征及归因分析

（1）土地利用变化面积比例

土地利用变化面积比例[25]可以反映流域所有类型土地变化总面积的整体情况，表征流域土地利用变化的剧烈程度。计算公式如下：

$$D=A/S\times100\% \tag{5}$$

式中：D为土地利用变化面积比例（%）；A为所有类型土地变化总面积（km^2）；S为流域总面积（km^2）。

（2）土地利用变化强度指数

土地利用变化强度指数[26]能够反映出某种土地利用类型增加或流失的程度。其计算公式如下：

$$I=\frac{U_2-U_1}{S}\times\frac{1}{T}\times100\% \tag{6}$$

式中：I为强度指数（%）；U_1和U_2表示研究时段初期和末期该土地利用的数量（km^2）；T为研究时段；其他参数意义同上。

（3）气候弹性和下垫面弹性系数的确定

本研究采用基于Budyko思想的弹性系数法[27]来分析绿水对气候要素和下垫面参数的敏感性，该法量纲为1，可以评价量纲不同的变量。根据相关研究，本研究分别定义了绿水的降水、潜在蒸散发以及下垫面参数的弹性系数，计算公式如下：

$$\varepsilon_P=\left\{1-\left[1+\left(\frac{ET_0}{P}\right)^{\omega}\right]^{\frac{1}{\omega}-1}\right\}\times\frac{P}{W_g} \tag{7}$$

$$\varepsilon_{ET_0}=\left\{1-\left[1+\left(\frac{P}{ET_0}\right)^{\omega}\right]^{\frac{1}{\omega}-1}\right\}\times\frac{ET_0}{W_g} \tag{8}$$

$$\varepsilon_{\omega}=\left[-\left(ET_0^{\omega}+P^{\omega}\right)^{\frac{1}{\omega}}\times\left(-\frac{\ln\left(ET_0^{\omega}+P^{\omega}\right)}{\omega^2}+\frac{1}{\omega}\times\frac{ET_0^{\omega}\ln ET_0+P^{\omega}\ln P}{ET_0^{\omega}+P^{\omega}}\right)\right]\times\frac{\omega}{W_g} \tag{9}$$

式中：ε_P为绿水对降水的弹性系数，表示单位降水变化导致流域绿水量的变化；ε_{ET_0}为绿水对潜在蒸散发的弹性系数，表示单位潜在蒸散发变化导致流域绿水量的变化；ε_{ω}为绿水对下垫面参数的弹性系数，表示单位下垫面参数变化导致流域绿水量的变化；W_g表示绿水资源量（mm）。

（4）归因分析

将研究期分为突变点前后2个时段，前后2个时段多年平均绿水量的变化记为ΔW_g，ΔW_g是由气候变化（降水、潜在蒸散发）和土地利用变化引起的，因此，可将ΔW_g表示为：

$$\Delta W_g=\Delta W_{gP}+\Delta W_{gET_0}+\Delta W_{g\omega} \tag{10}$$

式中：ΔW_{gP}为降水变化引起的绿水量变化；ΔW_{gET_0}为潜在蒸散发变化引起的绿水量；$\Delta W_{g\omega}$为下垫面参数变化引起的绿水量变化。ΔW_{gP}、ΔW_{gET_0}、$\Delta W_{g\omega}$计算公式为：

$$\Delta W_{gP}=\varepsilon_P\frac{W_g}{P}\Delta P \tag{11}$$

$$\Delta W_{gET_0}=\varepsilon_{ET_0}\frac{W_g}{ET_0}\Delta ET_0 \tag{12}$$

$$\Delta W_{g\omega}=\varepsilon_{\omega}\frac{W_g}{\omega}\Delta\omega \tag{13}$$

式中：ΔP、ΔET_0、$\Delta\omega$分别为突变点前后2个时段多年平均降水量、潜在蒸散发以及下垫面参数的差值。

降水、潜在蒸散发和下垫面参数对绿水变化的贡献率计算公式为：

$$\eta_P=\frac{\Delta W_{gP}}{\Delta W_g}\times100\% \tag{14}$$

$$\eta_{ET_0}=\frac{\Delta W_{gET_0}}{\Delta W_g}\times100\% \tag{15}$$

$$\eta_{\omega}=\frac{\Delta W_{g\omega}}{\Delta W_g}\times100\% \tag{16}$$

式中：η_P、η_{ET_0}、η_{ω}分别为降水、潜在蒸散发以及下垫面参数对绿水的贡献率。

chinaXiv:202106.00074v1

ChinaXiv合作期刊

3 结果与分析

3.1 流域气候特征分析

表1是砚瓦川流域基本水文气候特征值，由表1可知，1981—1989年和1990—1999年降水量减少，而1999年之后降水量呈现增加的趋势；以1999年为分界点，潜在蒸散发量呈现先增大后减少的趋势，在1990—1999年潜在蒸散发增大到峰值，之后持续减少；在整个研究期，气温呈现出持续增长的趋势，与全球气候变暖大背景一致；干旱指数在1990—1999年达到最大，最大值为3.83，在2000年以后，干旱指数降低。

表1 砚瓦川流域基本水文气候特征值

Tab. 1 Basic hydrological and climatic characteristics of the Yanwachuan Basin

年份	降雨/mm	潜在蒸散发/mm	气温/℃	干旱指数
1981—1989	541.2	1735.0	8.4	3.21
1990—1999	474.6	1818.8	9.1	3.83
2000—2009	540.0	1773.5	10.0	3.28
2010—2016	564.1	1762.2	10.2	3.12

注：干旱指数=潜在蒸散发/降水量。

从年际变化趋势上看（图2），该流域降水量和潜在蒸散发量呈现微弱的增加趋势，而气温呈现显著的增加趋势，于1996年出现明显谷值，于2013年出现明显峰值。由图3可知，降雨量从1985年开始降低，在2000年前后降至最低，之后持续增加，在2000年之后主要以正距平为主；气温在1996年之前为偏冷时期，之后为偏暖时期，分界比较明显；流域

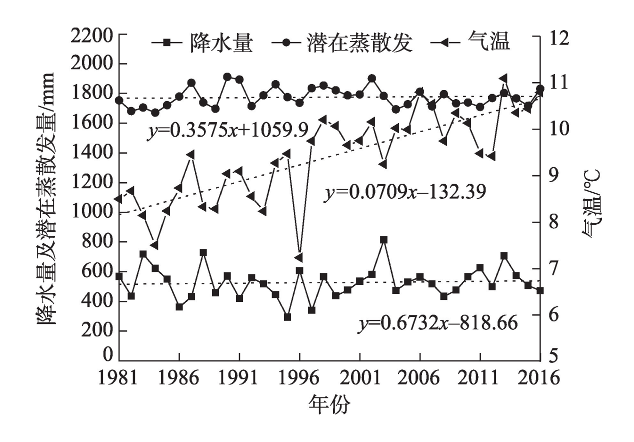


图2 砚瓦川流域降水、潜在蒸散发、气温年际变化规律

Fig. 2 Interannual variation of annual rainfall, potential evapotranspiration and temperature in the Yanwachuan Basin

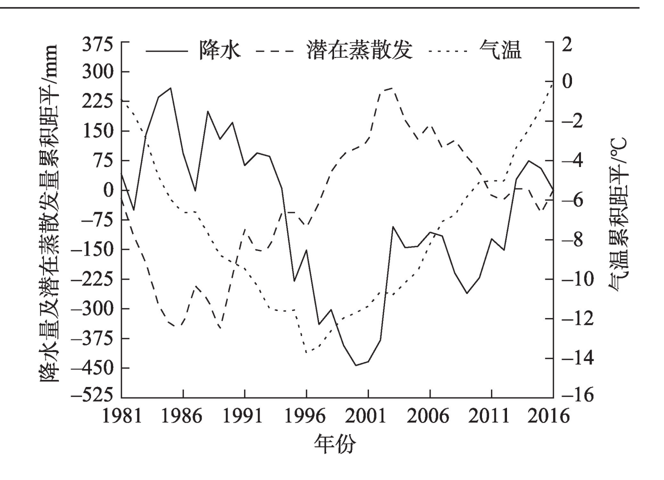


图3 砚瓦川流域降水、潜在蒸散发、气温累积距平值

Fig. 3 Cumulative interannual anomaly values of rainfall, potential evapotranspiration and temperature in the Yanwachuan Basin

潜在蒸散发量在1989年和2003年附近变化比较明显，1989年前累积距平值持续减少，1989—2003年累积距平值呈现上升趋势，而2003年之后，其累积距平值呈现下降趋势。

3.2 土地利用变化特征

统计不同时期砚瓦川流域土地利用各地类面积及其占比（图4）发现，砚瓦川流域土地利用类型主要以耕地、草地为主，耕地面积占比最大，均在50.0%以上，其次是草地，占比在35.0%左右；而水域面积较少，占比仅为0.1%，说明流域河流水系不发达。

图5和图6展示了各土地利用变化面积比例和各土地利用类型增加或流失的程度。2000—2010年土地利用变化面积比例最大，说明该时期流域土地利用变化最为剧烈，林地增加程度最大，草地流失程度最大，这与该时期实施退耕还林工程以及黄河水土保持生态工程等措施有关；1989—1995年土地利用变化面积比例最小，说明该时期流域土地利用相对稳定，变化面积比例相对较少。林地面积在1989—2010年加速增长，分别为0.13%、0.62%和8.38%；草地和居民用地在1989—1995年都呈现增大趋势，在1995年之后呈现减少趋势，2000—2010年减少速度最快，分别达到了-8.01%和-4.85%；水域面积在整个研究期（1989—2010年）一直在减少，变化速度为0、-0.03%和-0.03%；耕地面积在1989—1995年和1995—2000年减少，在2000—2010年增加，变化速度分别为-1.32%、-2.06%和4.51%。

chinaXiv:202106.00074v1

(a) 1989年 (b) 1995年 (c) 2000年 (d) 2010年

土地利用类型
耕地
林地
草地
水域
居民用地

注：饼图表示各土地利用类型的面积占比。

图4　不同时期砚瓦川流域土地利用分布及面积占比

Fig. 4　Distribution of land use and area proportion of Yanwachuan Basin in different periods

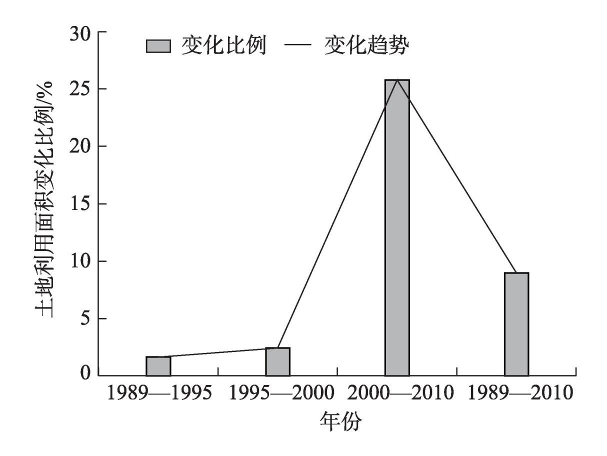


图5　不同时期砚瓦川流域土地利用面积变化比例

Fig. 5　Proportion of land use area change in the Yanwachuan Basin in different periods

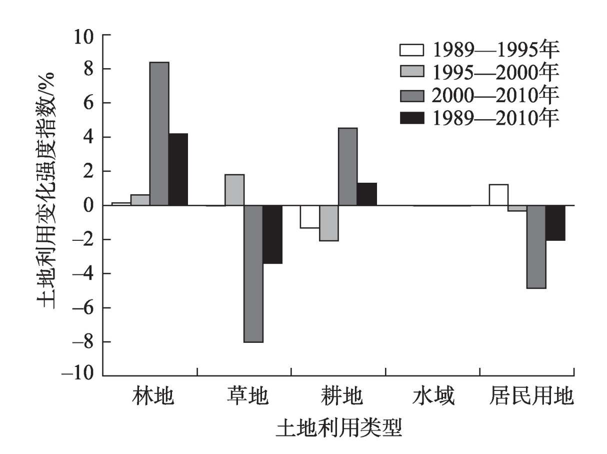


图6　砚瓦川流域土地利用变化强度指数

Fig. 6　Intensity index of land use change in the Yanwachuan Basin in different periods

chinaXiv:202106.00074v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202106.00074v1

3.3 傅抱璞模型模拟流域绿水量

在校准期，根据流域多年平均降水量、径流量以及潜在蒸散发量数据对模型中的参数ω进行优化（图7），得到ω最优取值，从图7可知，当ω值偏离2.806时，相对误差（R_e）、均方根误差（RMSE）的绝对值在变大，因此，确定流域ω值最优为2.806。基于最优参数取值的傅抱璞模型对砚瓦川流域绿水资源量模拟精度如表2所示。由表2可知，R_e 和RMSE的绝对值在校准期都最小，验证期的模拟精度有所降低，但 R_e 范围也在10%以内。

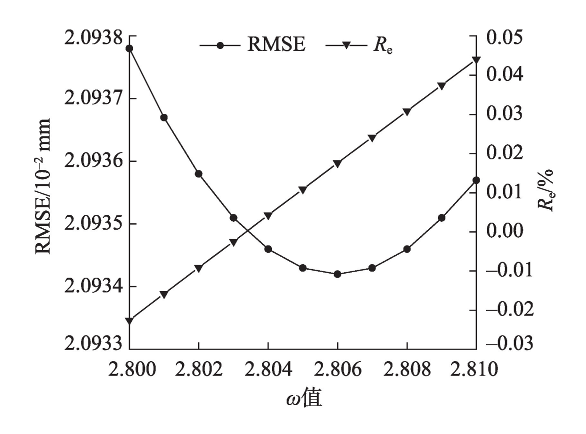


图7 相对误差（R_e）、均方根误差（RMSE）与ω值的关系

Fig. 7 Variations of R_e and RMSE with ω

表2 傅抱璞模型年绿水量模拟结果

Tab. 2 Statistics of the annual green water of Fu Baopu model

	ω值	相对误差（R_e）变化范围/%	相对误差（R_e）均值/%	均方根误差（RMSE）/mm
率定期（1981—2007年）	2.806	−5.22~4.30	0.02	0.0209
验证期（2008—2016年）	2.806	−2.83~1.17	−0.92	1.0142

注：ω为表征下垫面条件的参数，其取值范围为（1，∞）。

图8给出了傅抱璞模型校准期和验证期的砚瓦川流域多年平均绿水量，由图8可以看出，对比流域水量平衡法与傅抱璞模型得到的绿水资源量，拟合情况较好，总体来看模拟精度较高。这说明参数ω经过优化后，模型能够更准确的反映出流域绿水资源量的动态变化。

3.4 流域绿水变化趋势及突变点检验

根据1981—2016年砚瓦川流域绿水量变化曲线（图9）可知，流域多年平均绿水量为503.7 mm，绿水量年际变化范围在288.1~746.1 mm之间，年际变化显著。从变化趋势来看，年绿水量以0.669 mm·a^{-1}的速度微弱增加。根据1981—2016年砚瓦川流域绿水量累积距平分析结果（图10）可知，在2000年之前绿水量呈波动减少趋势，在2000年之后绿水量呈波动增加趋势。选用M-K检验法对年绿水资源量的突变点进行识别（图11），可以看出，UF未通过显

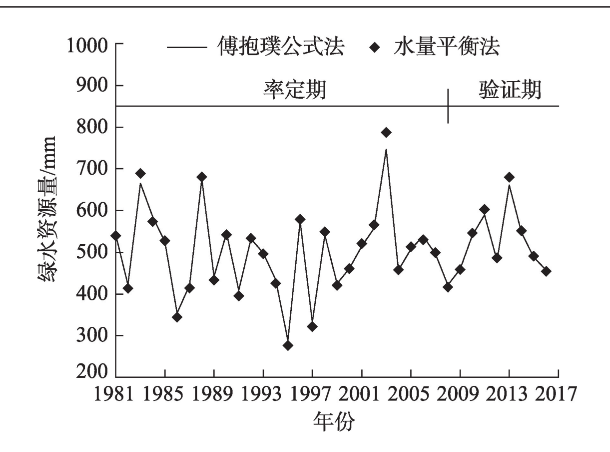


图8 率定期与验证期年实际绿水量模拟结果

Fig. 8 Simulation results of actual annual green water during the calibration and verification period

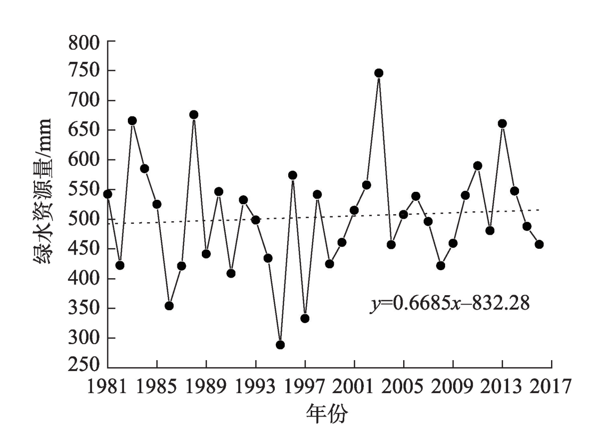


图9 1981—2016年砚瓦川流域绿水量变化趋势

Fig. 9 Variation trend of green water in the Yanwachuan Basin from 1981 to 2016

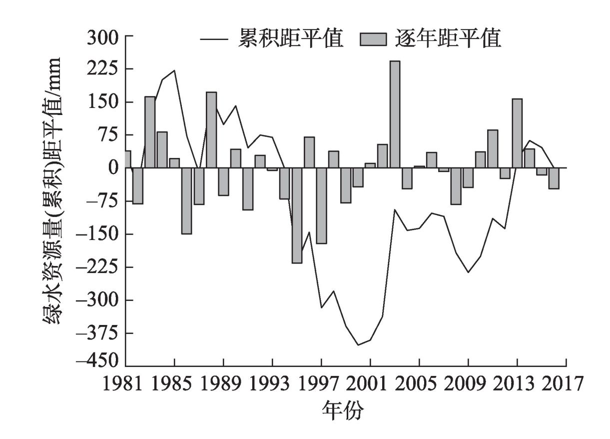


图10 1981—2016年砚瓦川流域年绿水量距平值

Fig. 10 Aomaly of annual green water in the Yanwachuan Basin from 1981 to 2016

ChinaXiv合作期刊

著水平检验。两曲线在置信区间内有多个交点，即绿水存在多个潜在的突变点，为了进一步确定突变点出现的年份，采用 F 检验曲线对以上可能出现的突变年份进行验证，结果如图12所示。从图中可以看出，突变点发生时间为2003年，这与M-K检验的一个突变检验年份吻合。以上结果表明，砚瓦川流域绿水量在2003年发生突变，这主要是由于，自2000年以来，在黄河水土保持生态工程项目支持下，流域内加大了水土保持治理的力度。

3.5 绿水的气候及下垫面弹性系数

为了进一步分析砚瓦川流域绿水资源量对气候变化和下垫面变化的敏感程度，采用弹性系数法对各影响因子进行了敏感程度计算，具体为：将整个时期分为突变点前后2个阶段，突变点前（1981—2002年）定义为基准期，突变点后（2003—2016年）定义为变化期，再分别对突变点前后2个时期计算绿水对

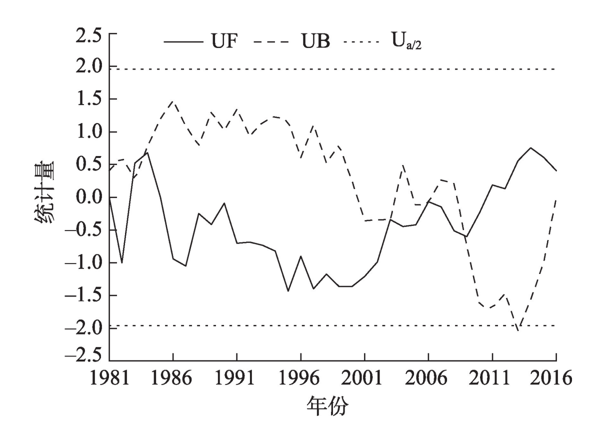


图11 砚瓦川流域年平均绿水量M-K检验结果

Fig. 11 Results of M-K test for annual green water in Yanwachuan Basin

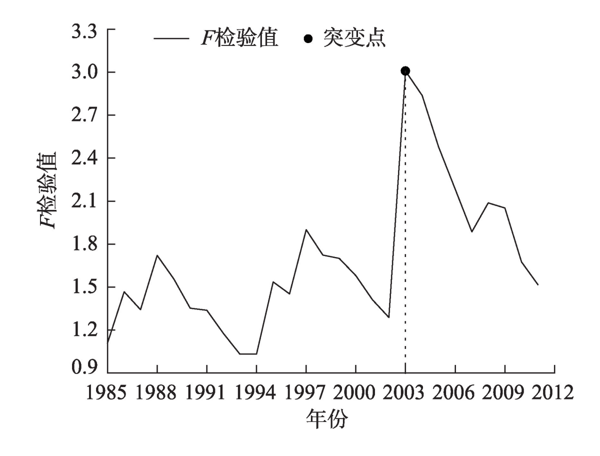


图12 砚瓦川流域年平均绿水滑动 F 检验曲线

Fig. 12 Sliding F test of annual average green water in the Yanwachuan Basin

气候和下垫面参数的弹性系数，结果如表3所示。

由表3可知，在1981—2016年，绿水对气候要素中降水和潜在蒸散发的弹性系数分别为0.93和0.07，对下垫面参数的弹性系数为0.18。

从突变点前后2个时期来看，流域下垫面参数由1981—2002年的2.704，增加到2003—2016年的3.004，主要原因是流域2003—2016年植被增加了[28]；绿水对气象要素的弹性系数中，对降水的弹性系数由0.93增大到0.94，表明由降水引起的绿水变化程度增强了；潜在蒸散发的弹性系数由0.08减少到0.07，表明由潜在蒸散发引起的绿水变化程度减弱了；绿水对下垫面参数的弹性系数由突变前的0.25减少到突变后的0.15，表明流域内下垫面参数变化对绿水变化的影响减弱了。整体而言，2003—2016年，砚瓦川流域绿水对降水的敏感性增加，对潜在蒸散发的敏感性不变，对下垫面参数的敏感性降低。

3.6 绿水变化的归因分析

表4是绿水变化的归因分析结果，可见，从基准期到变化期，年均绿水量增加了52.07 mm，其中，气候变化使绿水量增加了38.75 mm，对绿水变化的贡献率为74.42%，在气候要素中，降水对绿水增加的贡献率为75.63%，潜在蒸散发对绿水量增加的贡献率较小，为−1.21%；相比于气候要素，土地利用变化

表3 砚瓦川流域绿水的气候和下垫面弹性系数

Tab. 3 Elasticity coefficient of green water to climate and parameter ω in Yanwachuan Basin

年份	P /mm	ET_0 /mm	ω 值	ε_p /%	ε_{ET_0} /%	ε_ω /%
1981—2002	509.6	1785.6	2.704	0.93	0.08	0.25
2003—2016	553.9	1756.4	3.004	0.94	0.07	0.15
1981—2016	526.8	1774.3	2.806	0.93	0.07	0.18
突变点前后变化	44.3	29.2	0.300	–	–	–

注：P 为降水量；ET_0 为潜在蒸散发量；ω 值表示表征下垫面条件的参数；ε_p 为绿水对降水的弹性系数；ε_{ET_0} 为绿水对潜在蒸散发的弹性系数；ε_ω 为绿水对下垫面参数的弹性系数。

表4 砚瓦川流域绿水变化的归因分析

Tab. 4 Attribution of green water changes during the two periods

ΔW_g/mm	ΔW_{gP}/mm	ΔW_{gET_0}/mm	$\Delta W_{g\omega}$/mm	对绿水变化的贡献率/%		
				P	ET_0	ω 值
52.07	39.38	−0.63	13.32	75.63	−1.21	25.58

注：ΔW_g 为前后2个时段多年平均绿水量的变化；ΔW_{gP} 为降水变化引起的绿水量变化；ΔW_{gET_0} 为潜在蒸散发变化引起的绿水量；$\Delta W_{g\omega}$ 为下垫面参数变化引起的绿水量变化。

chinaXiv:202106.00074v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202106.00074v1

使绿水量增加了13.32 mm，对绿水量变化的贡献率是25.58%，由此可见，在砚瓦川流域，气候变化是绿水量变化的主要原因，而绿水对降水的敏感性要高于潜在蒸散发，这是因为绿水量主要来源于降雨量，降雨越大，流域蒸发蒸腾水量越充分，绿水量也就越大。

4 讨 论

气候变化和土地利用变化是影响流域水文过程变化的2个关键因素，量化两者对绿水资源量的相对贡献，可以为未来气候变化及土地利用变化下流域绿水资源的应用和管理提供科学依据。在全球变暖以及土地利用变化的背景下，本研究为了解决黄土高塬沟壑区缺水问题，提供了新思路，分析了绿水资源的变化特征，并定量分析了气候因素和土地利用因素对绿水资源的影响及其对绿水变化的贡献程度，研究结果可对黄土高塬沟壑区粮食生产和植被恢复等提供科学指导，同时可以为黄土高原地区水资源短缺问题提供新的解决思路。

1981—2016年砚瓦川流域绿水资源量呈现微弱的上升趋势，气候变化使得绿水量从基准期到变化期增加了38.75 mm，对绿水变化的贡献率是74.42%，其中，降水使得绿水增加了39.38 mm，对绿水变化的贡献率是75.63%；潜在蒸散发使得绿水减少了0.63 mm，对绿水变化的贡献率为−1.21%。本研究的结果与冯畅等[29]运用SWAT模型在涟水流域得到的研究结果一致，这一结果的产生主要是因为降水增加等气候变化因素引起的，由于绿水量主要来源于降雨量，降雨越大，流域蒸发蒸腾水量越充分，绿水量也就越大。同时，土地利用的变化也会致使绿水资源发生变化，本研究中，土地利用变化使得绿水量增加了13.32 mm，对绿水变化的贡献率为25.58%，这一结论与赵安周等[30]基于SWAT模型在渭河流域的研究结果一致。连勰等[31]在伊洛河上游流域也得到了相似的结论，但荣琨等[32]在晋江西溪流域的研究显示土地利用变化所引起的绿水资源变化呈减少趋势。导致这一结果的原因主要是林地、耕地和草地面积的减少。退耕还林还草工程改变了耕地、林地和草地在总面积中的占比使得耕地向草地和林地转换，减少了坡面径流，增加了土壤含水量，使得绿水量增加；在本研究中由于退耕还林工程的实施，林地面积增加，而耕地面积在2000年降低，在2010年时林地面积和耕地面积相比于前一时期都增加了。耕地面积增加会使农业灌溉用水增加，增大了土壤的含水量以及作物的蒸散发，更多的蓝水转化为了绿水，导致绿水增加。

在绿水变化的驱动因素中，气候变化为主要影响因子(74.42%)，其次为土地利用变化(25.58%)，这与夏露等[33]利用Zhang模型[34]在黄土高塬沟壑区南小河沟流域和Zhao等[35]在渭河流域得到的研究相似。本研究所使用的气象数据来源于西峰气象站，但近年来由于城市不透水面积的增加，导致观测数据受气候变化和土地利用变化共同影响，使用观测的数据来模拟流域绿水量并分析气候变化对其的贡献率可能不太准确。但是本项研究中，更多的重点放在了比较气候变化和土地利用变化影响之间的比较上，而不是偏重数量上。

5 结 论

本文以砚瓦川流域为研究区域，基于水热耦合平衡方程对1981—2016年流域的绿水变化进行了归因分析，得出以下结论：

(1) 1981—2016年流域内降水量、气温和潜在蒸散发量呈现上升趋势，并于2000年左右发生变化；在2000—2010年土地利用变化最为显著，林地增加程度最大，草地流失程度最大。

(2) 1981—2016年来砚瓦川流域多年平均绿水量为503.7 mm，呈上升趋势，并在2003年发生突变。

(3) 各气候要素中，绿水对降水和潜在蒸散发的弹性系数分别为0.93和0.07；对下垫面参数的弹性系数为0.18。绿水对降水最为敏感，其次是下垫面参数，而对潜在蒸散发的敏感度最小。

(4) 在气候变化和土地利用变化共同作用下，绿水资源量增加了52.07 mm，气候变化使绿水量增加了38.75 mm，其贡献率为74.42%；土地利用变化使绿水量增加了13.32 mm，其贡献率为25.58%；气候变化是绿水变化的主导因素。

参考文献(References)

[1] Falkenmark M. Meting water requirements of an expanding world population[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 1997, 352: 929-936.

[2] Rockström J. Green water security for the food makers of tomor-

ChinaXiv合作期刊

row: Windows of opportunity in drought-prone savannahs[J]. Water Science & Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2001, 43(4): 71.

[3] 程国栋, 赵文智. 绿水及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(3): 221-227. [Cheng Guodong, Zhao Wenzhi. Green water and its research progresses[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(3): 221-227.]

[4] Postel S, Daily G, Ehrlich P. Human appropriation of renewable fresh water[J]. Science, 1996, 271(5250): 785-788.

[5] 李蓝君. 南小河沟流域绿水的水文过程及其与植被类型的耦合关系[D]. 西安: 西安理工大学, 2018. [Li Lanjun. Hydrological process of green water in the Nanxiaohegou Basin and its coupling relationship with vegetation types[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.]

[6] 韩其飞, 陆研, 李超凡, 等. 气候变化对中亚草地生态系统碳循环的影响研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1351-1357. [Han Qifei, Lu Yan, Li Chaofan, et al. Impact of climate change on grassland carbon cycling in Central Asia[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(6): 1351-1357.]

[7] 刘濛濛, 隆永兰. 巴音布鲁克近58 a气候变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 715-723. [Liu Mengmeng, Long Yonglan. Climatic variation characteristics in Bayinbuluke during the past 58 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 715-723.]

[8] 岳辉, 刘英. 近15 a陕西省植被时空变化与影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(2): 314-323. [Yue Hui, Liu Ying. Vegetation spatiotemporal variation and its driving factors of Shaanxi Province in recent 15 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(2): 314-323.]

[9] 靳含, 杨爱民, 夏鑫鑫, 等. 基于CA-Markov模型的多时间跨度土地利用变化模拟[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1415-1426. [Jin Han, Yang Aiming, Xia Xinxin, et al. Simulation of land use change at different time spans based on CA-Markov model[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1415-1426.]

[10] Li L, Song X, Xia L, et al. Modelling the effects of climate change on transpiration and evaporation in natural and constructed grasslands in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2020, 302: 107077, doi: 10.1016/j.agee.2020.107077.

[11] 李蓝君, 宋孝玉, 夏露, 等. 黄土高原沟壑区典型造林树种蒸散发对气候变化的响应[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 148-159. [Li Lanjun, Song Xioayu, Xia Lu, et al. Response of evaporation and transpiration of typical afforestation tree species to climate changes in gully region of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(20): 148-159.]

[12] 赵安周, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 典型年份渭河流域蓝水绿水时空差异分析[J]. 中国农业气象, 2016, 37(2): 149-157. [Zhao Anzhou, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. Spatiotemporal variation of blue-green water under typical reference years in the Weihe River Basin[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(2): 149-157.]

[13] 甄婷婷, 徐宗学, 程磊, 等. 蓝水绿水资源量估算方法及时空分布规律研究——以卢氏流域为例[J]. 资源科学, 2010, 32(6): 1177-1183. [Zhen Tingting, Xu Zongxue, Cheng Lei, et al. Spatio-temporal distributions of blue and green water resources: A case study on the Lushi Watershed[J]. Resources Science, 2010, 32(6): 1177-1183.]

[14] 吕乐婷, 王晓蕊, 孙才志, 等. 基于SWAT模型的细河流域蓝水绿水资源量时空分布研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(1): 39-47. [Lü Leting, Wang Xiaorui, Sun Caizhi, et al. Study on the spatiotemporal variations of blue and green water resources in Xi River Basin using the SWAT model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(1): 39-47.]

[15] Gerten D, Hoff H, Bondeau A, et al. Contemporary green water flows: Simulations with a dynamic global vegetation and water balance model[J]. Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C, 2005, 30(6-7): 334-338.

[16] Zang C, Liu J, Jiang L, et al. Impacts of human activities and climate variability on green and blue water flows in the Heihe River Basin in northwest China[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2013, 10(7): 9477-9504.

[17] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. 大气科学, 1981, 5(1): 23-31. [Fu Baopu. On the calculation of the evaporation from land surface [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1981, 5(1): 23-31.]

[18] Budyko M I. Climate and life[M]. Pittsburgh: Academic Press, 1974: 508.

[19] Yang D, Sun F, Liu Z, et al. Interpreting the complementary relationship in non-humid environments based on the Budyko and Penman hypotheses[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(18): GL027657, doi: 10.1029/2006GL027657.

[20] 闫浩芳, 史海滨, 薛铸, 等. 内蒙古河套灌区 ET_0 不同计算方法的对比研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 103-106. [Yan Haofang, Shi Haibin, Xue Zhu, et al. Comparison of estimating ET_0 with different methods in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia[J]. Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(4): 103-106.]

[21] 黄俊雄, 韩丽, 许志兰, 等. 基于Budyko理论的北京地区实际蒸散发估算及特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(3): 1-7. [Huang Junxiong, Han Li, Xu Zhilan, et al. Estimation and variation of actual evapotranspiration of Beijing region based on Budyko theory[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(3): 1-7.]

[22] Kendall M G. Rank correlation methods[M]. London: Charles Griffin, 1975: 202.

[23] 韩飞飞, 闫俊杰, 郭斌, 等. 阿勒泰地区植被覆盖度及ET对气温变化的响应[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1436-1444. [Han Feifei, Yan Junjie, Guo Bin, et al. Response of vegetation cover and ET to temperature variation in Altay Prefecture[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1436-1444.]

[24] 陈广才, 谢平. 水文变异的滑动 *F* 识别与检验方法[J]. 水文, 2006, 26(2): 57-60. [Chen Guangcai, Xie Ping. Slide *F* test of

chinaXiv:202106.00074v1

ChinaXiv合作期刊

change-point analysis[J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26(2): 57-60.]

[25] 张冉, 王义民, 畅建霞, 等. 基于水资源分区的黄河流域土地利用变化对人类活动的响应[J]. 自然资源学报, 2019, 34(2): 274-287. [Zhang Ran, Wang Yimin, Chang Jianxia, et al. Response of land use change to human activities in the Yellow River Basin based on water resources division[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(2): 274-287.]

[26] 张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 干旱区绿洲土地利用/覆被及景观格局变化特征——以新疆精河县为例[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1251-1263. [Zhang Fei, Tashpolat Tiyip, Ding Jianli, et al. The change of land use /cover and characteristics of landscape pattern in arid areas oasis: A case study of Jinghe County, Xinjiang Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1251-1263.]

[27] 张树磊, 杨大文, 杨汉波, 等. 1960—2010年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(5): 605-613. [Zhang Shulei, Yang Dawen, Yang Hanbo, et al. Analysis of the dominant causes for runoff reduction in five major basins over China during 1960—2010[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(5): 605-613.]

[28] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇, 等. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(10): 1024-1034. [Yang Dawen, Zhang Shulei, Xu Xiangyu, et al. Attribution analysis for runoff decline in Yellow River Basin during past fifty years based on Budyko hypothesis[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2015, 45(10): 1024-1034.]

[29] 冯畅, 毛德华, 周慧, 等. 气候变化对涟水流域蓝水绿水资源的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(10): 1525-1537. [Feng Chang, Mao Dehua, Zhou Hui, et al. Impact of climate change on blue and green water resources in the Lianshui River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(10): 1525-1537.]

[30] 赵安周, 赵玉玲, 刘宪锋, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域蓝水绿水影响研究[J]. 地理科学, 2016, 36(4): 571-579. [Zhao Anzhou, Zhao Yuling, Liu Xianfeng, et al. Impact of human activities and climate variability on green and blue water resources in the Weihe River Basin of northwest China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(4): 571-579.]

[31] 连勰, 黄峰. 伊洛河上游流域退耕还林/还草对蓝水绿水分配的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(9): 1409-1420. [Lian Xie, Huang Feng. Green/blue water allocation as affected by Grain-for-Green practices in the upper reaches of the Yiluo River[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(9): 1409-1420.]

[32] 荣琨, 陈兴伟. 用SWAT模拟土地利用对绿水蓝水的影响: 以晋江西溪流域为例[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(1): 199-204. [Rong Kun, Chen Xingwei. Simulation of the effect of land use/cover change on green and blue water resource in Xixi watershed of the Jinjiang Basin with SWAT model[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(1): 199-204.]

[33] 夏露, 宋孝玉, 符娜, 等. 黄土高塬沟壑区绿水对土地利用和气候变化的响应研究——以南小河沟流域为例[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 678-688. [Xia Lu, Song Xiaoyu, Fu Na, et al. Impacts of land use change and climate variation on green water in the Loess Plateau gully region: A case study of Nanxiaohegou Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 678-688.]

[34] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. Water Resources Research, 2001, 37(3): 701-708.

[35] Zhao A, Zhu X, Liu X, et al. Impacts of land use change and climate variability on green and blue water resources in the Weihe River Basin of northwest China[J]. Catena, 2016, 137: 318-327.

chinaXiv:202106.00074v1

ChinaXiv合作期刊

Changing trend of green water and its driving factors in the gully region of the Loess Plateau

WANG Shaona[1], SONG Xiaoyu[1], LI Lanjun[1], LI Huaiyou[2], LI Yaolin[2]

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2. Xifeng Experiment Station of Soil and Water Conservation, Yellow River Conservancy Committee, Qingyang 745000, Gansu, China)

Abstract: The gully region of the Loess Plateau is the main rain-fed agricultural area in western China, which has long been considered a fragile area, and water shortage is a critical factor restricting the development of this area. Significant changes in climate characteristics and land-use status of the Loess Plateau have taken place with the proceeding of global climate fluctuation and regional implementation of soil and water conservation measures, which will have a far-reaching effect on green water. Therefore, an in-depth study on the response of green water to climate and land-use change is required, which would have remarkable theoretical and practical significance in providing useful indications for constructing an ecological environment construction and the improvement of the efficient use of green water resources in the Loess Plateau. Green water is estimated using the Budyko-based empirical model proposed by Fu Baopu, which excels at the estimation of green water at the basin scale, to better understand the response of green water to climate and land-use change from 1981 to 2016 in Yanwachuan Basin, which is a typical small basin in the Loess Plateau gully region. The trend of green water and its influencing factors were investigated using the Mann-Kendall test, F-test, and elastic coefficient method. In this study, to improve the applicability of the Fu Baopu model, the parameters of the model were calibrated and validated using the water-balance model and historical hydrometeorological data (e.g., monitored precipitation data, evaporation data, and runoff data). The simulation results show that (1) After parameter calibration, this empirical model presents a high simulation accuracy and great applicability in estimating green water over the Yanwachuan Basin. (2) The annual mean green water of the study area is 503.7 mm, showing an insignificant increase at the temporal scale, and its mutation points occurred in 2003. (3) The elastic coefficients of green water to precipitation, potential evapotranspiration, and underlying surface are 0.93, 0.07, and 0.18, respectively. It can be seen that green water is the most sensitive to precipitation, followed by the underlying surface, which is the least sensitive to potential evapotranspiration. (4) The green water increased by 38.75 mm from the base period to the change period due to climate changes, and the green water increased by 13.32 mm from the base period to the change period due to land-use changes. The contribution rates of precipitation variation, potential evapotranspiration variation, and the underlying surface change to the increase of green water were 75.63%, −1.21%, and 25.58%, respectively. It was clear that the influence of climate change on increasing green water is stronger than that of the underlying surface.

Key words: green water; climate change; land use change; Fu Baopu model; attribution analysis

chinaXiv:202106.00074v1